

Capítulo 3

CLORO



Introducción

En todo el mundo, el mecanismo de desinfección más aplicado en los sistemas de abastecimiento de agua es el que emplea el cloro y sus compuestos derivados como agentes desinfectantes. Fue introducido masivamente a principios del siglo XX y constituyó una revolución tecnológica, que complementó el proceso de filtración que ya era conocido y utilizado para el tratamiento del agua. La cloración, tal como se ha expresado en el capítulo anterior, incrementó en 50% la esperanza de vida de los países desarrollados.

La clave de su éxito es su accesibilidad en casi todos los países del mundo, su razonable costo, su alta capacidad oxidante, que es el mecanismo de destrucción de la materia orgánica, y su efecto residual. Todo ello permite en forma bastante simple, asegurar la inocuidad del agua desde que se produce hasta el momento que se usa, lo que resulta muy beneficioso, tanto en sistemas pequeños como en grandes ciudades con redes de distribución extendidas.

Aunque el cloro y sus derivados no son los desinfectantes perfectos, muestran las siguientes características que los hacen sumamente valiosos:

- | Tienen una acción germicida de espectro amplio.
- | Muestran una buena persistencia en los sistemas de distribución de agua, pues presentan propiedades residuales que pueden medirse fácilmente y vigilarse en las redes después que el agua ha sido tratada o entregada a los usuarios.
- | El equipo para la dosificación es sencillo, confiable y de bajo costo. Además, para las pequeñas comunidades hay dosificadores de “tecnología apropiada” que son fáciles de usar por los operadores locales.
- | El cloro y sus derivados se consiguen fácilmente, aun en lugares remotos de los países en desarrollo.
- | Es económico y eficaz en relación con sus costos.

Los productos de la familia del cloro disponibles en el mercado para realizar la desinfección del agua son:

- | cloro gaseoso
- | cal clorada
- | hipoclorito de sodio
- | hipoclorito de calcio.

Para elegir cuál de estos productos se ha de emplear, así como el mecanismo para suministrarlo, el(los) responsable(s) de esta selección deberá(n) basar su decisión en la respuesta a las siguientes interrogantes:

- | ¿Qué *cantidad* de desinfectante se necesita?
- | ¿Cuáles son las posibilidades de *abastecimiento* del producto?
- | ¿Con qué *capacidad técnica* se cuenta para el uso, la operación y mantenimiento de los equipos?
- | ¿Existen los recursos necesarios para evitar que los trabajadores estén expuestos a *riesgos* a la salud durante el almacenamiento y manipuleo?
- | ¿Se dispone de la capacidad económica y financiera para asumir los *costos* de inversión, operación y mantenimiento?

Para responder estas preguntas será necesario realizar un diagnóstico de las condiciones técnicas, económicas y sociales de la localidad.

La *cantidad* necesaria de desinfectante está en función del caudal de agua a tratar, la dosis requerida según la calidad del agua y las normas de calidad de agua de bebida del país. Existe, sin embargo, una regla no escrita que establece un límite entre el uso de cloro gas y otras formas. Tal frontera la marca el caudal de 500 m³/día. El uso de cloro gas no es recomendable para caudales menores de 500 m³/día, lo que a una dotación de 100 litros por habitante por día, típica del medio rural, significa que el cloro gas solo es recomendable para poblaciones mayores de 5.000 habitantes.

El *abastecimiento* del producto es un factor que condiciona la selección del mismo, ya que en muchos casos las zonas rurales se encuentran alejadas de las ciudades y son de difícil acceso, lo cual podría sugerir la necesidad de emplear otro desinfectante o bien preparar hipoclorito de sodio en la localidad.

La *capacidad técnica* disponible debe ser considerada para la selección, ya que operar instalaciones de cloro gaseoso requiere personal capacitado y competente, lo que es difícil de encontrar y remunerar en zonas rurales. Así mismo, el acceso a energía eléctrica de manera continua y estable es requisito indispensable para el empleo de bombas.

Dado que el cloro gaseoso es extremadamente peligroso, es importante disponer de medios técnicos y personal capacitado para minimizar y controlar los *riesgos* inherentes a las instalaciones de este tipo, ya que una fuga no detectada y controlada a tiempo podría ocasionar serios accidentes que podían poner en peligro vidas humanas.

Por último, en lo que se refiere a los *costos* de la desinfección, se habrá de tener en cuenta las circunstancias, por ejemplo, podría convenir una solución más costosa si la fiabilidad, durabilidad, sencillez de la operación y disponibilidad de los repuestos y suministros fueran mejores que los del sistema menos costoso. Generalmente, conviene pagar un poco más si la inversión adicional asegura el éxito; a la larga puede que inclusive resulte más económico. Dado que las concentraciones de cloro activo en los diferentes productos varían, el volumen requerido del mismo también variará, por lo que se deberán considerar los costos de transporte que serán distintos al ser distintos esos volúmenes. En todo caso, la salud debe ser la consideración principal al momento de seleccionar la alternativa más adecuada.

Propiedades de los productos de cloro y descripción del método

Las variedades comerciales del cloro se obtienen por métodos diferentes y de ellos dependen la concentración de cloro activo, su presentación y estabilidad. En el cuadro de la siguiente página se listan las principales propiedades de cada una de estas variedades en un cuadro comparativo.

Vale en este punto aclarar el concepto de “cloro activo” que se utiliza a lo largo del capítulo. “Cloro activo” significa el porcentaje en peso de cloro molecular que aporta un determinado compuesto en cualquier estado; lo que quiere decir que si una solución tiene 10% de cloro activo, ello se debe a que se han burbujado 10 gramos de cloro gas en 100 ml de agua y que el gas se ha absorbido totalmente y sin pérdida en ella. La solución tiene entonces 10 g de cloro en 100 g de agua (ya que 100 ml son prácticamente 100 gramos) y de allí el “10%”. La palabra “activo” significa que ese cloro está listo para entrar en acción; está pronto y “esperando” para atacar la materia orgánica o cualquier otra sustancia que sea oxidable por él.

El método de desinfección con cloro y sus derivados se deberá implementar en tres pasos sucesivos, cada uno de los cuales variará, en mayor o menor grado, según el producto que se va a utilizar:

Paso 1: Evaluación de la cantidad de cloro que se va a dosificar en la red

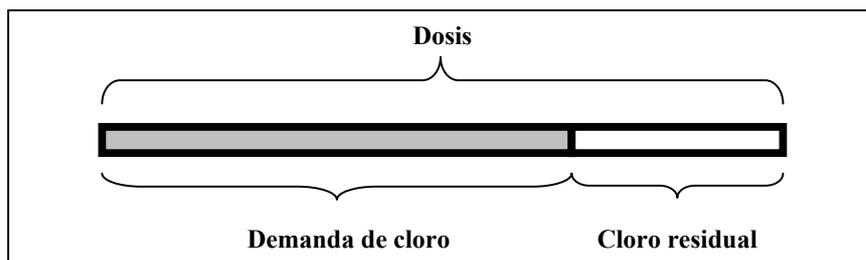
Paso 2: Preparación de las soluciones de los productos no gaseosos

Paso 3: Calibración del dosificador.

Nombre y fórmula	Nombre comercial o común	Características	% Cloro activo	Estabilidad en el tiempo	Seguridad	Envase usual
Cloro gas Cl_2	Cloro licuado Cloro gaseoso	Gas licuado a presión	99,5%	Muy buena.	Gas altamente tóxico	Cilindros de 40 a 70 kg. Recipientes de 1 a 5 toneladas
Cal clorada $\text{CaO} \cdot 2\text{CaCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Cal clorada, polvo blanqueador, hipoclorito de cal, cloruro de cal	Polvo blanco seco	15 a 35%	Media. Se deteriora rápidamente cuando se expone a temperatura alta, humedad y/o luz solar. Pérdida de 1% al mes.	Corrosivo	Latas de 1.5 kg Tambores de 45 - 135 kg Bolsas plásticas o de papel de 25 - 40 kg, otros.
Hipoclorito de sodio NaClO	Hipoclorito de sodio, blanqueador líquido, lejía, agua lavandina, agua sanitaria	Solución líquida amarillenta	1 a 15% como máximo. Concentraciones mayores a 10% son inestables.	Baja. Pérdida de 2-4% por mes; mayor si la temperatura excede los 30°C	Corrosivo	Diversos tamaños de botellas de plástico y vidrio, y garrafones
	Hipoclorito de sodio por electrólisis <i>in situ</i>	Solución líquida amarillenta	0.1 - 0.6 %	Baja	Oxidante	Cualquier volumen
Hipoclorito de calcio $\text{Ca}(\text{ClO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	HTH, Perclorón	Polvo, gránulos y tabletas. Sólido blanco	Polvo: 20 - 35% Granulado: 65 - 70% Tabletas: 65 - 70%	Buena. Pérdida de 2 a 2.5% por año	Corrosivo. Inflamación posible al entrar en contacto con ciertos materiales ácidos.	Latas de 1.5 kg, tambores 45 - 135 kg, Balde de plástico

Paso I: Evaluación de la cantidad de cloro a dosificar en la red

La cantidad de cloro que se va a dosificar equivale a la demanda total de cloro (la cual está estrechamente ligada a la calidad química y microbiológica del agua) a la que debe adicionarse la cantidad de cloro residual esperada en el extremo de la red. Por tanto, antes de llevar a cabo el proceso de desinfección es conveniente realizar ensayos de consumo instantáneo de cloro. Este ensayo se denomina “*ensayo de demanda de cloro*”.



Relación Dosis-Demanda-Residual

Si no se lleva a cabo la prueba de demanda y si la desinfección no reviste un carácter de urgencia (cloración preventiva), la cantidad de compuesto de cloro a introducir se puede regular mediante la aplicación directa de cantidades crecientes de cloro hasta obtener la concentración residual requerida en el extremo de la red. Se puede necesitar varios días hasta que la dosis se ajuste al valor ideal. Para este efecto, entre dosis sucesivas, debe transcurrir un intervalo de tiempo, en atención al tiempo que demora el agua desde el punto de aplicación del cloro hasta el extremo más alejado de la red.

En situaciones de emergencia, una primera estimación de la cantidad de cloro que se debe aplicar se puede calcular con un ensayo “rápido” de la demanda. Este método consiste en introducir cantidades crecientes de cloro (por ejemplo, entre 1 y 10 mg/l) en muestras del agua a tratar. Al final de 30 minutos se mide, en cada muestra, la concentración de cloro residual. La dosis de cloro se determina por la muestra que contiene la concentración de cloro residual más próxima a la pretendida. No obstante, cuando se inicia el proceso de desinfección y el agua es enviada a la red de distribución, es necesario hacer un ajuste posterior de las concentraciones debido a que siempre existe la posibilidad de contaminación por infiltración en la red o por otros factores.

Paso 2: Preparación de soluciones para productos no gaseosos

Cuando se emplea el cloro gaseoso, este se aplica directamente a través del dosificador. Lo mismo no ocurre cuando se trata de otros productos de cloro que se comercializan en forma de sólidos o se encuentran en concentraciones que no se adaptan a los requerimientos necesarios. En estos casos, se debe proceder a su disolución, de acuerdo con el mecanismo de dosificación del equipo que se va a emplear.

Las fórmulas que rigen la cantidad de agua de disolución requerida para obtener una solución de hipoclorito con una concentración de cloro activo que permita su fácil manejo y control por el dosificador, son las siguientes:

A partir de:	hipoclorito de sodio	hipoclorito de calcio
Descripción	Es comercializado en forma líquida en concentraciones variables de cloro activo, la presentación de 10% la más común.	Se comercializa en forma de sólido. El contenido de cloro activo es variable según su presentación, siendo la de 60% una de las más comunes.

<p>Agua de disolución requerida</p>	<p>Definida la concentración final de la solución de cloro (Cf) a ser empleada por el dosificador, se aplica la siguiente ecuación para obtener el volumen del agua de disolución (Vd) que será agregada a la solución matriz:</p> $Vd = (Co.Vo/ Cf) - Vo$ <p>Donde: Co = Concentración inicial de la sol. Matriz (g/L) Vo = Volumen de la sol. Matriz (L) Cf = Concentración esperada de la sol. Diluida (g/L)</p>	<p>Definida la concentración final (Cf) a ser empleada por el dosificador, se aplica la siguiente ecuación para obtener el volumen del agua de disolución (Vd) en litros que será agregada a la masa de hipoclorito de calcio sólido:</p> $Vd = \% \times P / Cf$ <p>Donde: % = Porcentaje de cloro activo en el producto P = Peso del sólido de hipoclorito de calcio (Kg) Cf = Concentración esperada en la sol. diluida (g/L)</p>
<p>Ejemplo</p>	<p>Se tienen 40 litros de una solución de hipoclorito de sodio al 10% (0.1) y se quiere preparar con ella otra solución de concentración 2% (0.02), ¿cuánta agua se debe agregar?</p> $Vd = \frac{0.1 \times 40}{0.02} - 40 = 160 \text{ L}$	<p>Si se dispone de 1,2 kg de hipoclorito de calcio de concentración 60% (0,6) y se desea obtener una solución para dosificar de concentración 2% (0,02), ¿cuánta agua se deberá usar?</p> $Vd = \frac{0.6 \times 1.2}{0.02} = 36 \text{ L}$

Debe recordarse que la capacidad de los tanques de disolución (dos como mínimo) debe corresponder a un período de 24 horas de tal manera que facilite su operación. Asimismo, se debe asegurar la completa disolución del producto en el agua. El empleo de un agitador eléctrico puede facilitar tal tarea. Por otro lado, es común encontrar partículas o impurezas por lo que el dosificador deberá contar con un filtro que las retenga para evitar su obstrucción. Asimismo, la alcalinidad del hipoclorito de sodio concentrado precipita la dureza del agua de dilución, lo cual también puede producir incrustaciones en los dosificadores y tuberías. Por ello se recomienda preparar la solución con 24 horas de anticipación, de tal manera que los precipitados tengan tiempo de sedimentar.

Paso 3: Calibración del dosificador

La calibración del dosificador para aplicar la cantidad óptima de producto depende de tres factores:

- 1 Las características físicas del producto a emplear: gaseoso, líquido o sólido.
- 1 La dosis de cloro necesaria para obtener la concentración de cloro residual esperada en el extremo de la red.
- 1 El caudal de agua a desinfectar. En caso de que no sea factible controlar las variaciones de caudal, por ejemplo en manantiales, se deberá considerar el caudal máximo de la fuente.

La dosis de cloro se obtendrá a través del estudio de la demanda de cloro (Paso I) y de la concentración de cloro residual esperada, la cual está usualmente definida por las normas de calidad del agua que rigen en cada país. Al respecto y como referencia, la OMS considera que una concentración de 0,5 mg/l en cloro residual libre en el agua, luego de un período de contacto de 30 minutos, garantiza una desinfección satisfactoria.

En cuanto al caudal de agua a tratar, este no solo condiciona la cantidad de cloro a dosificar, sino también el tipo de equipo que se adapte mejor a esta necesidad. Por ejemplo, no es lo mismo un equipo de inyección de gas cloro para desinfectar 10 m³/s, que un tanque dosificador de

hipoclorito de sodio a carga constante para desinfectar 1 l/s. Por consiguiente, el procedimiento de calibración varía según el dosificador y éste a su vez, depende del caudal de agua a desinfectar.

Tomando en cuenta estos factores, los dosificadores que se encuentran disponibles en el mercado se pueden clasificar en *cloradores* para gas y *dosificadores mecánicos* y *bombas dosificadoras* para solución líquida. La calibración de estos equipos puede realizarse manualmente y automáticamente en los sistemas más sofisticados, siendo el primero el más empleado para ciudades de porte medio y pequeñas comunidades. A continuación se resume el método de calibración que deberá emplearse en función del dosificador.

Dosificador	Cloradores para cloro gaseoso	DOSIFICADOR MECANICO y BOMBA DOSIFICADORA Para solución líquida
Descripción	Los cloradores de gas disponen de un rotámetro o dispositivo de medición que permite la calibración del equipo. Sin embargo, la mejor manera de determinar la tasa real de cloro gas es a través de la fluctuación del peso de los cilindros. Por lo tanto, es obligatorio el uso de balanzas apropiadas que permitan determinar este gasto en el tiempo.	Para determinar la cantidad de hipoclorito en solución se emplea la misma ecuación utilizada para determinar la cantidad de agua de disolución. Es importante disponer de dos tanques de disolución de dimensiones adecuadas que permitan el abastecimiento continuo de la solución de cloro al dosificador mecánico o tanque regulador con bomba dosificadora.
La cantidad a dosificar se calcula a partir de la siguiente Fórmula	$M = D \times Q$ Donde: M (gCl/mh) = Cantidad de cloro a dosificar D (gCl/m3) = Dosis de cloro Q (m3/h) = Caudal del agua a tratar	$M = (D \times Q)/C$ Donde: M (L/h) = Cantidad de cloro a dosificar D (mg/L) = Dosis de cloro Q (L/h) = Caudal de agua a tratar. C (mg/L) = Concentración de la solución
Ejemplo	Para una solución de cloro de 4 gCl/m3 en una fuente con caudal de 1.000 m3/h, se tendrá un gasto de 4 KgCl/h ó 96 Kg de cloro al día. Esto permitirá atender el suministro de cloro en 10 días con un cilindro de una tonelada.	Para una dosis de cloro equivalente a 4 mg/L en una fuente con caudal de 10,000 L/h y una concentración de solución de hipoclorito de 2%, se requiere suministrar 2 L/h.

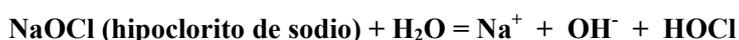
Mecanismos de la desinfección con cloro

La cloración del agua potable se lleva a cabo mediante el burbujeo del cloro gaseoso o mediante la disolución de los compuestos de cloro y su posterior dosificación. El cloro en cualquiera de sus formas, se hidroliza al entrar en contacto con el agua, y forma ácido hipocloroso (HOCl) de la siguiente forma:

En el caso del *cloro gaseoso*, la reacción que tiene lugar es:



En el caso del *hipoclorito de sodio*, la reacción que tiene lugar es:

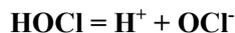


En el caso del *hipoclorito de calcio* y la porción activa de la *cal clorada*, la reacción es:



Durante el proceso químico de la desinfección se producen compuestos tales como cloraminas, dicloraminas y tricloraminas en presencia de amoníaco en el agua. Las cloraminas sirven igualmente como desinfectantes aunque reaccionen de una manera sumamente lenta. Asimismo, se forman el ácido clorhídrico (HCl) y los hidróxidos de calcio y sodio, los cuales no participan en el proceso de desinfección.

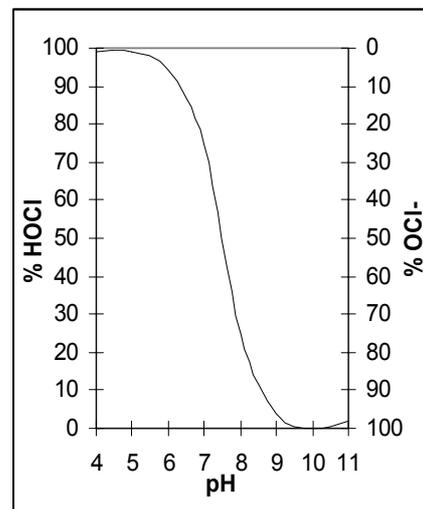
La especie desinfectante es el ácido hipocloroso (HOCl), el cual se disocia en iones hidrogenios (H⁺) e hipoclorito (OCl⁻) y adquiere sus propiedades oxidantes::



Ambas fracciones de la especie son microbicidas y actúan inhibiendo la actividad enzimática de las bacterias y virus y produciendo su inactivación

Tanto el ácido hipocloroso (HOCl) como el ión hipoclorito (OCl⁻) están presentes hasta cierto punto cuando el pH varía entre 6 y 9 (el rango usual para el agua natural y potable). Cuando el valor de pH del agua clorada es 7,5, el 50% de la concentración de cloro presente será ácido hipocloroso no disociado y el otro 50% será ión hipoclorito. Los diferentes porcentajes de HOCl y OCl⁻ a diferentes valores de pH pueden verse en la figura.

Las diferentes concentraciones de las dos especies significan una considerable diferencia en la propiedad bactericida del cloro, ya que estos dos compuestos presentan diferentes propiedades germicidas. En realidad, la eficiencia de HOCl es por lo menos 80 veces mayor que la del OCl⁻.



Comportamiento de las fracciones del ácido hipocloroso respecto a variaciones de pH

Por esta razón, cuando se monitorea el cloro del agua, es aconsejable vigilar el pH, ya que esto dará una idea del potencial real bactericida de los desinfectantes presentes. En tal sentido, es importante mencionar que la OMS recomienda para una desinfección adecuada un pH < 8.

La turbiedad es otro factor de peso en la desinfección, ya que una excesiva turbiedad reducirá la efectividad por absorción del cloro y, por otro lado, protegerá a las bacterias y virus de su efecto oxidante. Por tal, la OMS recomienda una turbiedad menor de 5 UNT, siendo lo ideal menos de 1 UNT.

Subproductos de la desinfección con cloro

En un sistema de abastecimiento de agua, la cloración se realiza normalmente al final del tratamiento, después de la etapa de filtración. A ello a veces se le denomina *poscloración*. A veces se realiza una cloración previa a cualquier otro tratamiento, llamado en este caso, *precloración*. Esta se lleva a cabo con el propósito de controlar las algas que puedan obstruir los filtros y eliminar el gusto y el olor del agua. En este caso y cuando el agua sin tratar lleva algunos materiales orgánicos

llamados “precursores” (materia orgánica, ácidos húmicos, etc.), se pueden generar los subproductos de la desinfección (SPD), que se mencionaron anteriormente. Los constituyentes más característicos de los SPD de la cloración son los trihalometanos (THM).

Este tema ha sido tratado en el capítulo anterior y en caso de mayor interés, se ofrece la bibliografía al final del capítulo, donde se presenta la publicación de la OPS/ILSI que cubre prácticamente todos los aspectos de los SPD, tanto técnicos, como toxicológicos y epidemiológicos.

Equipos

La selección del dosificador o alimentador de cloro depende de tres factores:

- 1 Las características del producto clorado.
- 1 La dosis de cloro en el agua.
- 1 El caudal del agua a desinfectar.

Con estos factores es posible clasificar algunos de los equipos más usados:

Clasificación	Equipo dosificador	Producto	Rango de servicio (habitantes)
Cloro gaseoso	A presión (directo) Al vacío (Venturi o eyector)	Gas Cloro Gas Cloro	5.000 habitantes a grandes ciudades
Solución	Bajo presión atmosférica, de carga constante		
	Tanque con válvula de flotador Tubo con orificio en flotador Sistema vaso /botella	Hipoclorito de Na o Ca Hipoclorito de Na o Ca Hipoclorito de Na o Ca	< 20.000
	Bajo presión positiva o negativa		
	Bomba de diafragma(positiva) Dosificador por succión(negativa)	Hipoclorito de Na o Ca Hipoclorito de Na o Ca	[2.000 – 300.000]
Sólido	Generador de hipoclorito de sodio <i>in situ</i>		< 5.000 hab.
	Dosificador de erosión Otros dosificadores	Hipoclorito de Calcio Cal clorada	[2.000 – 50.000] < 2.000

Equipos dosificadores de cloro gaseoso

La desinfección por medio de cloro gaseoso es económica y es la tecnología más usada en todo el mundo. Más de 90% de la población mundial bebe agua que ha sido desinfectada por cloro gaseoso. El gas se presenta comercialmente en cilindros de acero de 75 kg y una tonelada y en camiones o contenedores especialmente diseñados.

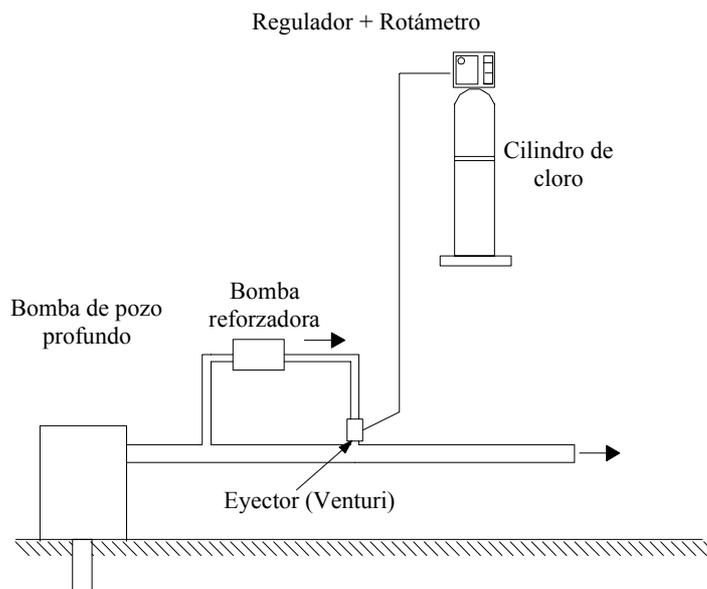


Cilindros de una tonelada y tanque rodante con cloro

Los dosificadores de cloro gaseoso trabajan bajo dos principios: *funcionamiento al vacío* por inyección en tubería y *funcionamiento a presión* por difusión en canales abiertos o tubería. El más común es el de funcionamiento al vacío.

Cloradores gaseosos de funcionamiento al vacío

Este sistema comprende un cilindro con el gas, un regulador con un rotámetro (indicador de tasas de alimentación) y un eyector. El sistema trabaja debido al vacío que se genera en el eyector tipo Venturi accionado por un flujo de agua, el cual eyecta una mezcla de agua y de gas en el punto de aplicación, donde el gas se difunde y disuelve. El sistema debe estar provisto de válvulas antirretorno para impedir el ingreso del agua a la tubería de transporte de cloro, con el objeto de prevenir la corrosión del equipo en los casos en que por algún motivo se interrumpa su funcionamiento.



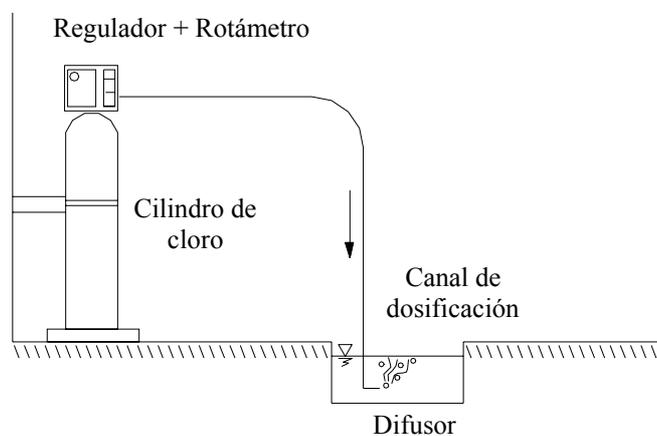
Equipo de cloro gas al vacío



Cilindros múltiples de 75 Kg (“manifold”) y tanque de una tonelada métrica al eyector

Cloradores gaseosos de funcionamiento a presión.

Este tipo de clorador suele recomendarse cuando no hay posibilidad de usar un diferencial de presión o no se dispone de una fuente de electricidad para operar una bomba reforzadora que produzca el diferencial de presión necesario para el funcionamiento de los cloradores al vacío.



Equipo dosificador de cloro gas a presión



El sistema consta de un diafragma activado por un regulador a presión y un rotámetro que indica la tasa de flujo de cloro. El paso del cloro gas hacia el difusor es controlado por un regulador

Instalación y requerimientos de instalación de los cloradores gaseosos

Para implementar un sistema de cloración a gas, es necesario determinar el tipo de clorador más adecuado. Los factores que determinan el tipo de clorador de gas que se va a instalar se refieren a la capacidad para suministrar la cantidad necesaria de cloro por unidad de tiempo (kg/h), así como a la flexibilidad de operación. La ecuación sobre la cual se basa este cálculo ha sido explicada líneas arriba al estudiar la calibración de los cloradores, ecuación que queda enunciada de la siguiente manera cuando se aplica la conversión correspondiente:

$$M = 3,6 D \times Q$$

Donde:

M (gCl/h) = Cantidad de cloro a inyectar

D (mgCl/l) = Dosis de cloro

Q (l/s) = Caudal máximo de agua a tratar.

Para los *cloradores de vacío* más pequeños, las tasas típicas de dosificación varían de 10 a 100 g/h, aproximadamente. Los equipos más usados cuentan con capacidad máxima de operación de 2 kg/h, 5 kg/h y 10 kg/h, lo que permite atender desde ciudades de porte medio hasta metrópolis.

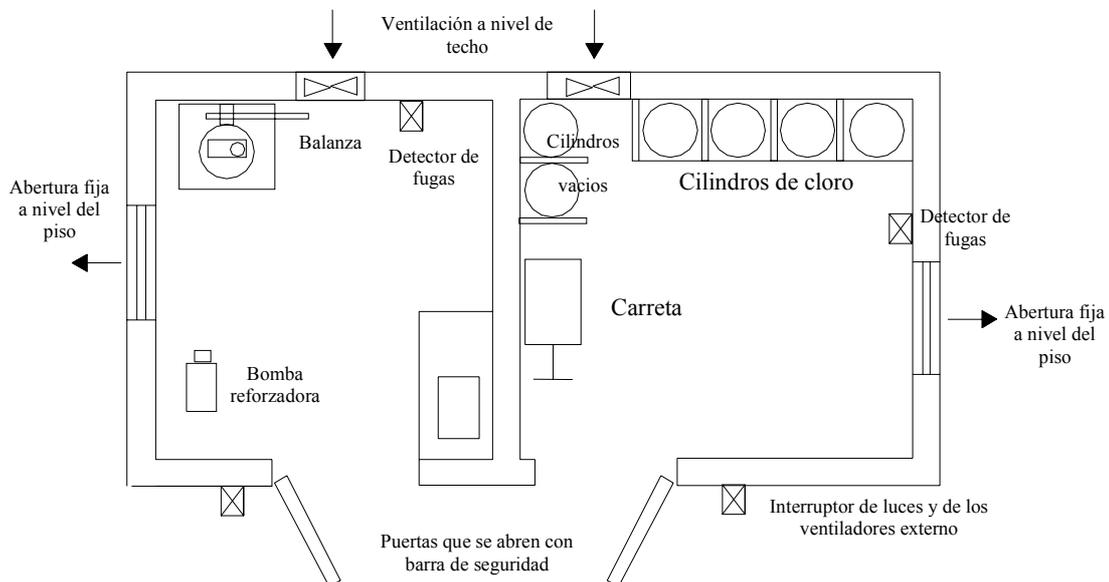
Los *cloradores a presión* más pequeños tienen una capacidad que varía entre 10 y 150 g/h. A partir de un cálculo simple, si se agrega al agua para desinfectarla una cantidad de 1 mgCl/litro y si la dotación de la población es de 100 litros/habitante x día, ello implica que con una dosis de 100 g cloro/h se puede desinfectar agua para una población de 24.000 habitantes y con 1 kg cloro/h, a una población de 240.000 habitantes.

Como la presión del cloro gas en el cilindro cambia en función de la temperatura ambiente, la tasa máxima de dosificación continua debe calcularse de acuerdo con la temperatura ambiente más baja prevista. Para una dosificación continua de cloro gas de 120 g/h, la temperatura ambiente tiene que ser superior a -5° C.

En cuanto a los requisitos y precauciones de instalación, debe mencionarse que la manera más exacta de determinar la tasa efectiva de alimentación del cloro gas que se está dosificando es midiendo el peso del cloro consumido, por lo cual es imprescindible usar balanzas apropiadas. El pesaje correcto permitirá hacer un cálculo exacto de la cantidad de cloro que se está dosificando durante un período determinado y también indicará cuándo o cuán pronto habrá que cambiar los cilindros. Las balanzas para los sistemas pequeños de abastecimiento de agua están diseñadas para pesar cilindros de 45 ó 70 kg en posición vertical. Todas las instalaciones de cloración de gas deben estar dotadas de cadenas u otro aparejo bien asegurado a una pared para evitar que los cilindros de cloro se volteen accidentalmente.

El cloro es un gas peligroso, por lo que debe manejarse con cuidado. Para garantizar la mayor seguridad y economía, los sistemas de cloración de gas deben ser diseñados e instalados por personas experimentadas y deben ubicarse lejos de laboratorios, almacenes, oficinas, salas de operación, etc., para evitar la contaminación ante una posible fuga. En la figura se muestra un plano típico para la instalación pequeña de cloración con gas. Los cilindros de cloro deben guardarse en una habitación separada, diseñada específicamente para ese fin. Los cilindros de cloro nunca se deben guardar donde les dé la luz solar directa para evitar que se calienten. Se debe proporcionar la ventilación adecuada a las instalaciones, siempre en el nivel del piso ya que el cloro es más pesado que el aire. Los cilindros de una tonelada de capacidad se colocan en posición horizontal, por lo cual deberán contar con grúas para su recambio y de un sistema de anclaje para evitar su rodamiento.

Plano típico para una pequeña instalación de cloración con gas



En los sistemas de *cloro de funcionamiento a presión* es importante que la cámara de contacto, ya sea un canal o un tanque, se diseñe de modo que siempre haya una carga mínima de agua de 0,5 metros sobre el difusor para asegurar que se disuelva todo el cloro gas y evitar que se pierda en el aire. Por otro lado, este tipo de clorador se activa por la propia presión del gas cloro en el cilindro, por lo cual no requiere de energía eléctrica externa. Esto es una ventaja en los casos en que no se

dispone de una fuente de energía hidráulica o eléctrica para producir el diferencial de presión requerido por el clorador del tipo de vacío.

La energía eléctrica para operar los *cloradores de funcionamiento al vacío* es relativamente pequeña, pues solo se requiere la energía necesaria para introducir el flujo de agua a través del eyector (Venturi). El flujo de agua y la presión diferencial que se requieren pueden producirse por medios eléctricos o hidráulicos con ayuda de una pequeña bomba auxiliar (reforzadora), generalmente de 1 a 1,5 HP. En la selección del equipo operado eléctricamente, la fiabilidad y estabilidad de la fuente de energía es una consideración importante.

Como medida de seguridad, en ambos sistemas, se coloca una válvula manual de alivio de presión entre el clorador y el difusor para descargar (al exterior del edificio) el cloro gas que pueda haber, cuando se cambian los cilindros. Al respecto, es necesario que las grandes plantas de tratamiento dispongan siempre de un sistema de detección de fugas y de una reserva de productos para neutralizar el cloro.

Se debe tener cuidado con los materiales que se emplean en los equipos de cloro, ya que estos se comportan de modo diverso en lo que respecta a la oxidación. El cuadro siguiente muestra la resistencia que ofrecen algunos de los materiales más comunes.

Resistencia de algunos materiales a las diferentes formas de cloro					
	Acero macizo	Acero inoxidable	Cobre	PVC	Teflón (PTFE)
Cloro gaseoso seco	Buena hasta 120°C	Buena hasta 150°C	Buena hasta 200°C	Buena hasta 40°C	Buena hasta 200°C
Cloro gaseoso húmedo	Nula	Nula	Nula	Buena hasta 40°C	Buena hasta 200°C
Cloro líquido	Buena	Buena	Buena	Nula	Aceptable

Operación y mantenimiento de los cloradores a gas

Los *cloradores de funcionamiento al vacío* requieren inspección y mantenimiento con regularidad por operadores capacitados y que se sigan las recomendaciones del fabricante para asegurar su funcionamiento adecuado y evitar reparaciones y accidentes costosos. Este tipo de sistema generalmente es duradero y relativamente exento de dificultades. Hay que tener sumo cuidado de que la humedad no se mezcle con el cloro gaseoso dentro del sistema dosificador, pues el cloro gaseoso húmedo corroerá o deteriorará rápidamente el equipo: partes plásticas, herrajes de metal, válvulas, conexiones flexibles, etc. Los materiales del sistema de cloración, incluidos los repuestos y accesorios, tienen que ser apropiados para el manejo del cloro gaseoso húmedo y seco. El cloruro férrico que se deposita en las tuberías, generalmente debido a las impurezas del cloro, se debe limpiar con regularidad. En todo momento se debe tener a mano una cantidad adecuada de repuestos. Las conexiones flexibles deben reemplazarse conforme a lo recomendado por el fabricante. Los empaques de plomo entre el cilindro y el clorador se deben utilizar solo una vez. Cuando sea necesario cambiar cilindros será necesario abrir las juntas entre los cilindros y los cloradores, en cuyo caso, o por cualquier otra razón se deben reemplazar por empaques nuevos recomendados por el fabricante. La reutilización de empaques usados es probablemente la causa más común de las fugas de cloro gas.

En los *equipos cloradores de funcionamiento a presión* se deben tener las mismas consideraciones que en los de funcionamiento al vacío. Adicionalmente, se deberá tener presente

que la difusión del cloro en tubería se dificulta cuando la contrapresión supera los 10 m de columna de agua, en cuyo caso se deberá optar por seleccionar cloradores con funcionamiento al vacío.

Es práctica común que un operador compruebe y, en caso necesario, ajuste la dosis de cloro gas tres o cuatro veces en un turno de ocho horas. Se debe tener presente que la extracción de cloro gas no debe exceder de 18 kg al día en un mismo cilindro, ya que una extracción mayor producirá el congelamiento del cilindro debido a la rápida caída de presión “efecto Joule-Thompson”.

El cambio rutinario de un cilindro vacío a otro lleno suele tomar menos de 15 minutos a un operador experimentado. Cuando se realiza esta maniobra, por seguridad, siempre deben estar presentes al menos dos operarios.



**Equipo de
protección personal**

Tal como se indicó, el cloro gaseoso es extremadamente tóxico y corrosivo, por lo que su utilización exige rigurosas reglas de seguridad. Por ejemplo, en caso de incendio, se dará prioridad a la remoción de los tanques o cilindros, dado que su resistencia al calor solo se garantiza hasta 88° C (a presión interna de 30 bares). Debido a que el acero se quema en un ambiente con cloro, es preciso evitar agrietar los contenedores con un golpe (no emplear el martillo para desbloquear o descongelar las válvulas). El cloro húmedo es muy corrosivo: una fuga de cloro provocará una corrosión externa, mientras que el ingreso de agua a la tubería de transporte de cloro producirá una corrosión interna de la tubería.

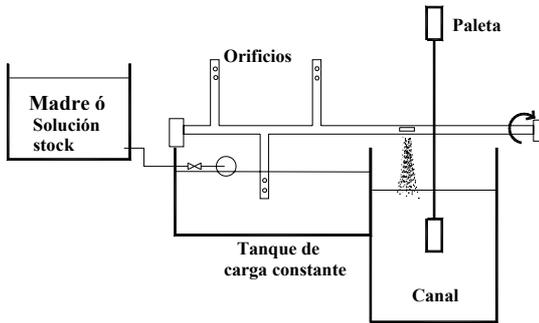
El uso de máscaras antigás es obligatorio siempre que haya manipulación de los contenedores en todos los ambientes donde se almacene el cloro. Las máscaras con filtros de cartucho tienen un tiempo de vida limitado.

Dosificadores de hipoclorito bajo presión atmosférica

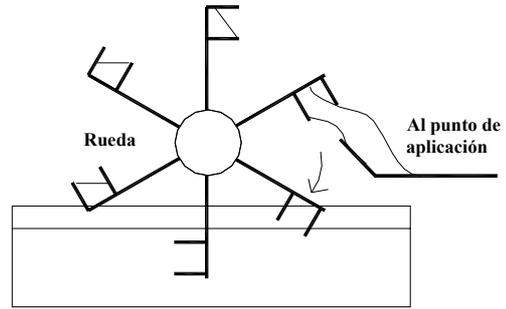
Fuera del gas, todos los otros productos químicos basados en el cloro son líquidos o siendo sólidos pueden ser disueltos y usados como una solución. La desinfección con hipoclorito es la más popular en el medio rural. Es sencilla, fácil, económica y hay muchos dispositivos de tecnología apropiada disponibles.

Existen varias maneras de alimentar una solución y los dosificadores se pueden clasificar según su fuerza de impulsión. Así, hay los que trabajan bajo presión atmosférica y los que trabajan bajo presión positiva o negativa.

Los dispositivos que trabajan bajo presión atmosférica se han diseñado con carga variable, como el *dosificador de paletas en canal* o el de *rueda de Arquímedes*.



Dosificador de paletas en canal

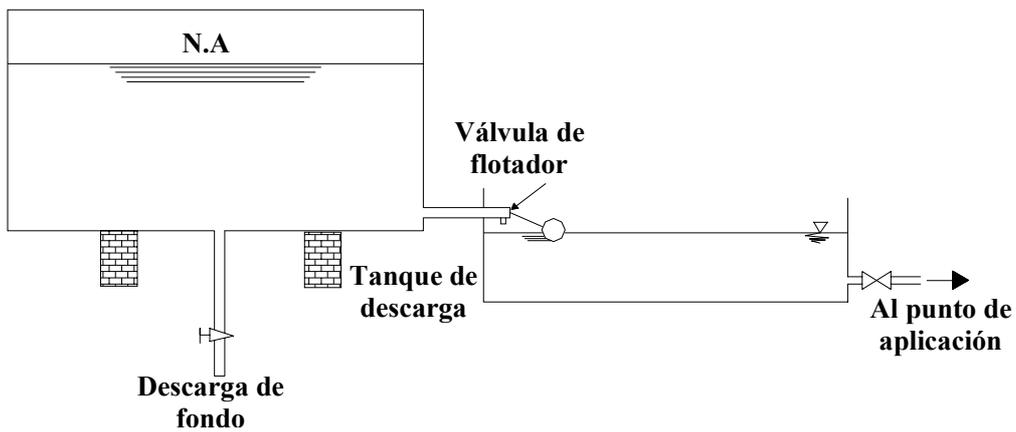


Rueda de Arquímedes

Sin embargo, los más usados son los que operan bajo el principio de “carga constante” debido a su mayor precisión y confiabilidad. Un sistema de carga constante está compuesto de dos elementos: un tanque de carga constante que contiene una solución madre o stock a ser dosificada y un mecanismo de regulación. Aquí se muestran tres de los sistemas más recomendados, los cuales están hechos con materiales que se pueden obtener fácilmente en el ámbito local. De ellos, tal vez el más popular ha sido el sistema de tubo con orificio en dispositivo flotante, el cual se utiliza en numerosos países.

Sistema de tanque con válvula de flotador

El corazón de este sistema es una válvula de flotador, similar a la que se usa en los inodoros. Uno o dos tanques contienen la solución madre (“stock”, “matriz” o “concentrada”) a ser alimentada y la válvula de flotador se coloca en un tanque pequeño. El sistema, aunque sencillo y barato, es bastante exacto.



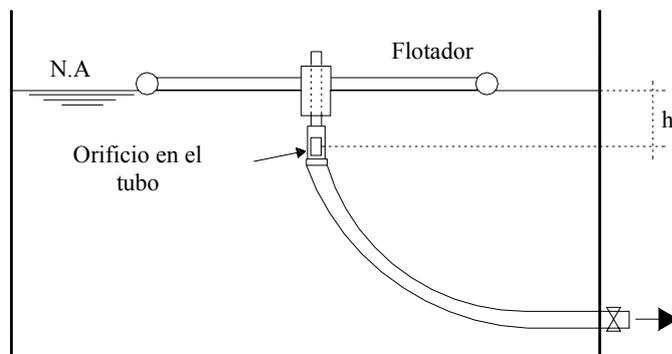
Tanque con válvula de flotador



Sistema de tubo con orificio en flotador

Se ha usado ampliamente con arreglos diferentes. El elemento básico es un tubo de PVC con uno o más orificios. El tubo se fija a un dispositivo flotante y el orificio debe colocarse algunos centímetros debajo del nivel de la solución. La solución ingresa al tubo y fluye a la tasa deseada de alimentación hacia el punto de aplicación. Una ventaja de este tipo de hipoclorador es que no se corroe, debido a que está hecho de tubería plástica, además no hay válvulas que se descompongan y se limpian fácilmente las obstrucciones producidas por depósitos de calcio o magnesio. La tasa de dosificación se puede ajustar fácilmente con tan solo cambiar la profundidad de inmersión de los orificios. Cuando se diseña, instala y mantiene adecuadamente, este tipo de clorador ha demostrado ser exacto y fiable.

Dosificador de tubo con orificio, en flotador



Instalación y requerimientos de instalación

Estos sistemas deben construirse con materiales que resistan la corrosión de una solución fuerte de hipoclorito. El tanque de solución puede ser de polietileno de alta densidad (PEHD), fibra de vidrio o de asbesto-cemento. El flotador puede hacerse con PVC o madera. No deben usarse aluminio, acero, cobre ni acero inoxidable porque se destruyen rápidamente.

Este equipo es sencillo de instalar, como todos los equipos de carga constante. Su aplicación está limitada a aquellos casos en que la solución de hipoclorito puede fluir por gravedad hacia el sitio de mezcla, ya sea un canal, una cámara de contacto de cloro o directamente hacia un tanque de

almacenamiento. La instalación debe incorporar un intervalo de aire en la tubería de descarga para evitar la posibilidad de sifonaje. También debe estar diseñado de modo que se excluya la posibilidad de que el contenido del tanque de solución se descargue todo de una vez accidentalmente en el canal de mezcla o la cámara de contacto si se rompe un accesorio o tubería o si ocurre otro tipo de derrame. El diseño de la instalación debe facilitar el manejo de los compuestos de cloro, la mezcla de soluciones y el ajuste de la dosificación. Se debe colocar un grifo de agua en un lugar conveniente para facilitar la preparación de las soluciones madre y para el aseo general.

Operación y mantenimiento

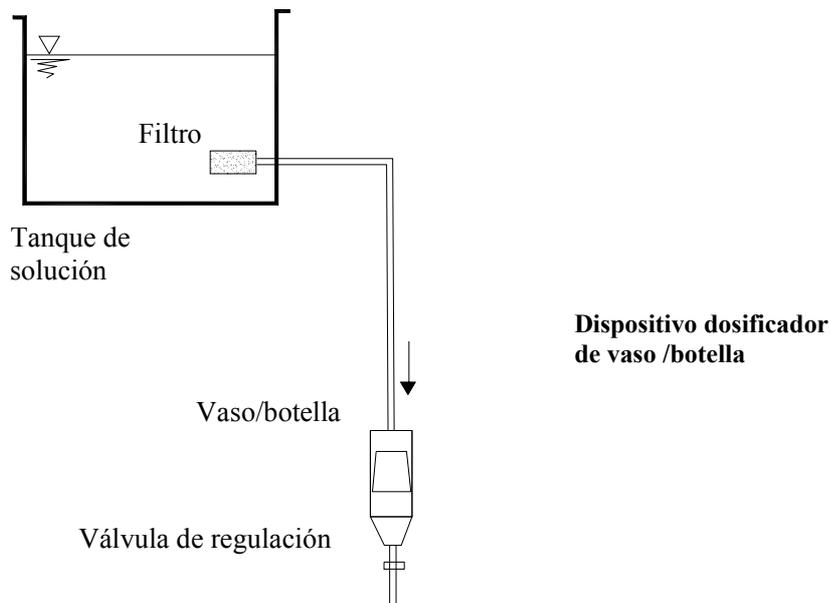
Estos equipos son fáciles de operar, mantener y reparar, y no requieren operadores especializados. Estos pueden ser capacitados fácilmente en un breve período de tiempo. Sin embargo, se requiere vigilancia constante para cerciorarse de que el equipo, en particular el de orificio sumergido, se mantenga limpio, que la dosificación sea la adecuada, que la solución del tanque no se haya agotado o debilitado su concentración, que no haya cambio de caudal, etc. Por ello se deberá limpiar periódicamente y usar un filtro para retener el material particulado



La preparación manual de la solución de hipoclorito se tiene que hacer con mucho cuidado, como se explicó anteriormente. Cuando se usa hipoclorito de calcio, la concentración de la solución debe ser entre 1% y 3% de cloro disponible para impedir la formación excesiva de depósitos y sedimentos de calcio. Las soluciones de hipoclorito de sodio pueden ser hasta de 10%. Las concentraciones mayores no son aconsejables porque pierden potencia rápidamente y si son muy altas se pueden cristalizar.

Sistema de vaso/botella

Este sistema fue desarrollado en Argentina en la década de 1970 por uno de los autores de este manual a solicitud de la OPS, para la desinfección del agua en zonas rurales. Consta de un tanque con la solución madre, un elemento de dosificación, conexiones y una válvula de regulación. Este sistema es preciso, económico y fácil de construir y de operar. El rango de dosificación es de 2 a 10 l/h, lo que lo hace aplicable para pequeñas comunidades de hasta 20.000 habitantes. La colocación de dos o más dosificadores en paralelo permite dosificaciones mayores.



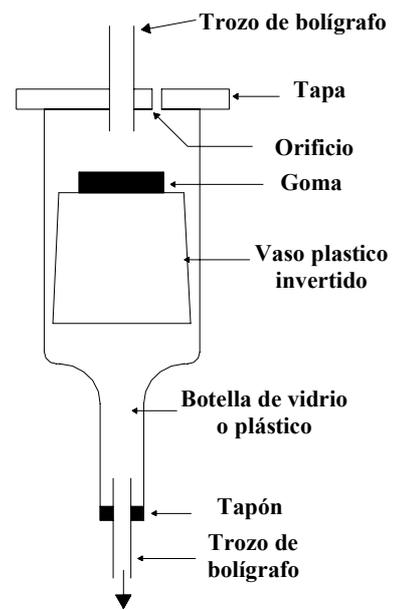
Instalación y requerimientos

El tanque debe instalarse 1 m (o más) por encima del nivel del elemento de dosificación. El elemento de dosificación es un sistema sencillo compuesto de un envase con un dispositivo flotante y se construye con una botella cilíndrica de vidrio o plástico con paredes lisas y con una capacidad entre 1,5 y 1,0 litros. La base de la botella debe extraerse y colocarse invertida (el cuello mirando hacia abajo).

Sobre la parte superior (área de la base extraída) se pega una tapa pequeña con masilla epóxica. Esta tapa tiene dos orificios. Uno central, donde se introduce otro tubo plástico de 1/4" o bien un pedazo de lapicero plástico sin la carga, sobresaliendo aproximadamente 1 cm. Este tubo debe soldarse firmemente o pegarse a la tapa y sus bordes deben nivelarse y suavizarse. El segundo permite que el aire fluya libremente. La tapa puede hacerse de madera o de plástico.

Sobre la parte superior (área de la base extraída) se pega una tapa pequeña con masilla epóxica. Esta tapa tiene dos orificios. Uno central, donde se introduce otro tubo plástico de 1/4" o bien un pedazo de lapicero plástico sin la carga, sobresaliendo aproximadamente 1 cm. Este tubo debe soldarse firmemente o pegarse a la tapa y sus bordes deben nivelarse y suavizarse. El segundo permite que el aire fluya libremente. La tapa puede hacerse de madera o de plástico.

El dispositivo flotante es un vaso o frasco de plástico con o sin tapa, colocado invertido (con la boca hacia abajo) dentro de la botella. Sobre la parte externa de la base se pega



Elemento de dosificación sistema vaso/botella

un pedazo de goma blanda. Con el aire mantenido en el interior, tanto el frasco como el vaso plástico funcionarán como un dispositivo flotante. El flujo se regula con una válvula sencilla de fabricación local.

Operación y mantenimiento

La operación de este equipo es sencilla. Una vez realizadas las conexiones respectivas, se deberá agregar la solución de hipoclorito y verificar que en los conductos no exista aire. Luego, utilizando la válvula, se procede a regular la dosis suministrada. Si la solución madre se termina y el dosificador se “seca”, el dispositivo flotante caerá y al ser llenado nuevamente puede desacomodarse, por lo que se sugiere no dejar secar el recipiente con la solución madre. Otro pequeño detalle a tener en cuenta son los insolubles. Debido a que los conductos son relativamente estrechos, se debe usar hipoclorito líquido, de preferencia, y no olvidar colocar un filtro para eliminar el material particulado.



Los dosificadores de presión positiva trabajan con el principio de que la solución de cloro es presurizada encima de la presión atmosférica y posteriormente inyectada a una cañería (tubería) de agua. El sistema de presión positiva más importante es la popular bomba de dosificación de diafragma.

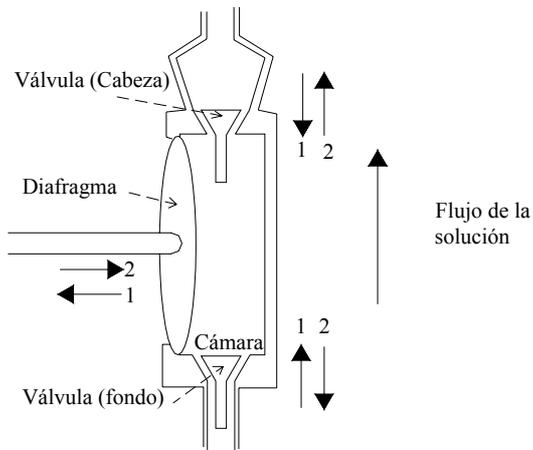
Por otro lado, los dosificadores de presión negativa o de succión trabajan con el principio de que la solución de cloro es succionada por el vacío que crea un dispositivo Venturi o al conectar el dosificador a una tubería de aducción. El sistema de presión negativa más usado es el dispositivo Venturi y se instala en la misma tubería presurizada de abastecimiento de agua o en una línea alterna, como se mostrará más adelante.

Botella con un frasco plástico

Sistema de dosificación con bomba de diafragma

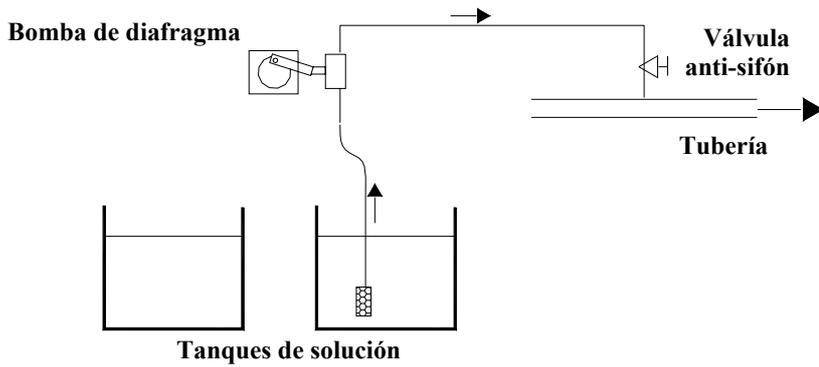
Estas bombas están equipadas con una cámara que tiene dos válvulas unidireccionales, una a la entrada y otra a la salida. La solución se incorpora en la cámara a través de la válvula de admisión a medida que se abre el diafragma y es forzada fuera de la cámara por la válvula de salida mientras se cierra el diafragma, el cual es impulsado por un motor eléctrico. El diafragma flexible está hecho de un material resistente a los efectos corrosivos de las soluciones de hipoclorito

La tarea de la bomba es elevar la solución por medio de una serie de golpes. El punto de aplicación puede ser un canal o un reservorio (presión atmosférica) o una tubería con agua bajo presión positiva.

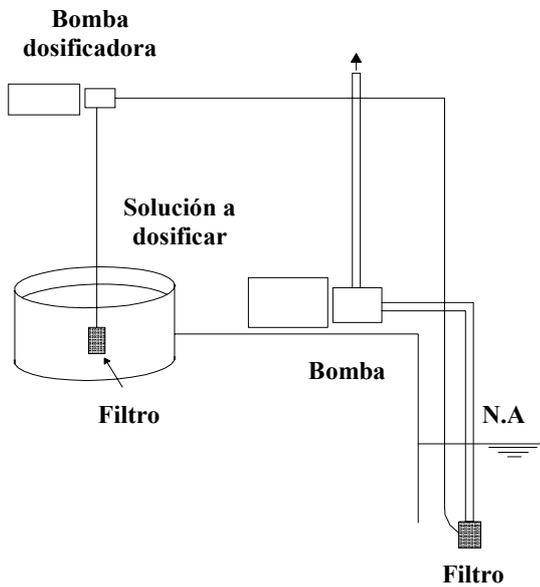


Detalle operativo del cabezal con su diafragma

Bomba de cabezales múltiples



Equipo dosificador con bomba de diafragma en tubería bajo presión positiva



Equipo dosificador con bomba de diafragma en tubería bajo presión negativa (tubería de aducción)

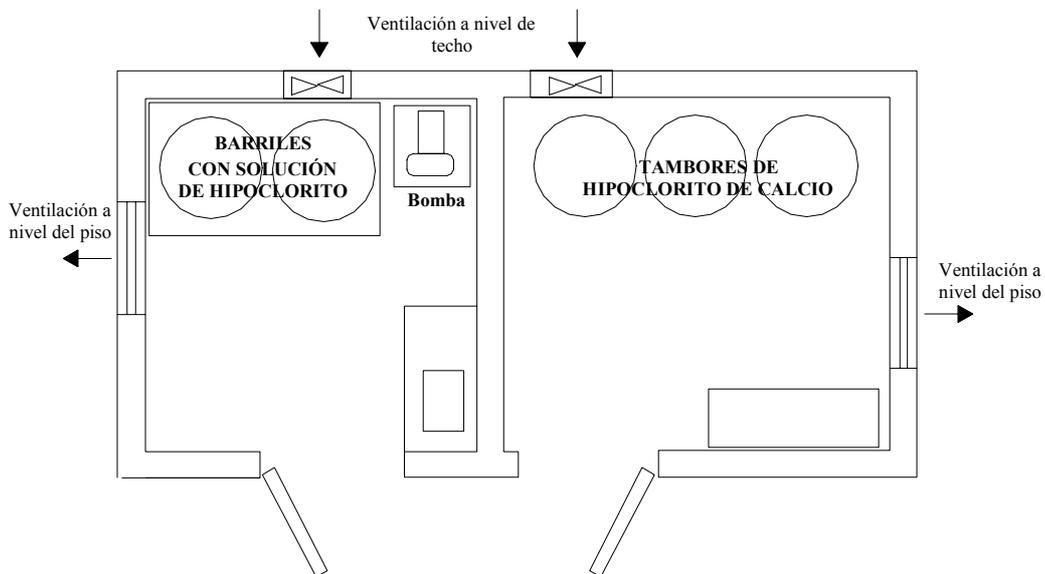
La capacidad de esta clase de hipoclorador es amplia; el más pequeño suministra cerca de un litro de hipoclorito/hora y los más grandes cerca de 200 litros/hora. Dependiendo de la concentración de la solución y dosificación de cloro deseada, puede desinfectarse agua de muy variado caudal.

1 **Instalación y requerimientos**

El método más común de accionar las bombas de diafragma es con un motor eléctrico. Las de accionamiento hidráulico son menos comunes. Estas últimas pueden usarse cuando no se dispone de una fuente fiable de energía eléctrica. Una ventaja de este sistema es que con un dispositivo especial se puede calibrar la velocidad de dosificación del hipoclorito con la velocidad de flujo del agua. Una desventaja del accionamiento hidráulico es su complejidad mecánica, la que frecuentemente resulta en problemas de operación y mantenimiento. La energía requerida para operar el hipoclorador es relativamente pequeña, generalmente de $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$ HP. Es importante considerar la fiabilidad y la calidad de la fuente de energía al escoger este tipo de clorador.

Una instalación bien diseñada debe proteger los productos químicos contra la luz solar, así como proporcionar condiciones para manejar y mezclar fácilmente las soluciones químicas. También debe estar bien ventilada y evitar temperaturas y humedad muy altas. La instalación se debe diseñar de manera que se facilite la operación y el mantenimiento y se reduzca al mínimo los riesgos potenciales del cloro. Se recomienda tener un cuarto separado para almacenar el hipoclorito debido a su naturaleza corrosiva y reactiva. En la figura se muestra el diagrama de una instalación típica de cloración con hipoclorito de calcio.

Instalación típica de hipoclorito de calcio



Operación y mantenimiento

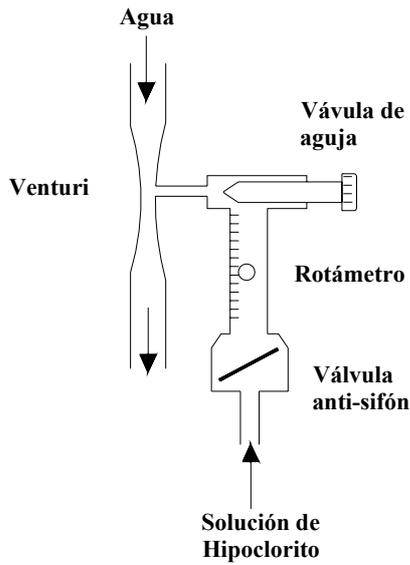
El caudal de las bombas de diafragma puede regularse para ajustar la dosificación de la solución de hipoclorito, ajustando ya sea la frecuencia o la longitud del recorrido de la biela. La mayoría de los hipocloradores utilizan motores de velocidad variable para regular la frecuencia del recorrido de la biela. Algunos emplean medios mecánicos para ajustar la longitud del recorrido y unos pocos utilizan ambos métodos. En la mayoría de los sistemas pequeños de abastecimiento de agua, el control de la frecuencia del recorrido de la biela parece ser el preferido por su sencillez. En el caso de arranque-parada, el control suele hacerse manualmente, al igual que la tasa de dosificación, pero el control arranque-parada también puede ser automático usando un interruptor de activación magnética conectado directamente al regulador de la bomba de agua. Por lo general, para comunidades pequeñas no se recomiendan sistemas complicados de control que ajusten las tasas de dosificación automáticamente.

La operación y mantenimiento de este tipo de cloradores es sencilla, pero requiere de un mantenimiento continuo y adecuado. La exactitud y la uniformidad de la dosificación pueden obtenerse si el equipo se mantiene libre de precipitados y depósitos en las válvulas. Generalmente se recomienda una concentración de 1 a 3% para las soluciones madre de hipoclorito de calcio a fin de alcanzar un equilibrio económico entre los costos de bombeo y el de evitar la precipitación de calcio en las válvulas de retención y la cámara del diafragma. Se deberá tener especial atención cuando el agua es dura, con altos contenidos de sólidos disueltos o cuando se emplee cal clorada disuelta. Se recomienda el empleo de soluciones de hipoclorito de sodio menores de 10% para evitar precipitados y mantener la estabilidad del cloro.

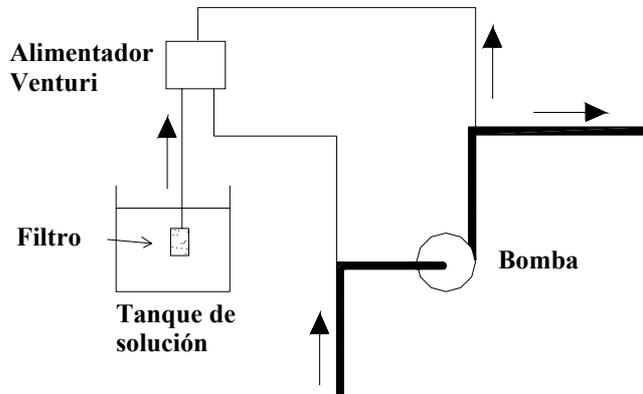
Como la bomba de diafragma está formada por piezas metálicas, puede sufrir corrosión y acortar su vida útil. Por este motivo es preciso cambiar la bomba periódicamente. Las válvulas de retención están expuestas a la deposición de calcio, por lo que hay que limpiarlas con una solución ácida para evitar un funcionamiento deficiente y tener que reemplazarlas con mayor frecuencia cuando pierdan su elasticidad debido a la oxidación. También es preciso manipular con cuidado las soluciones de hipoclorito. Estas son sumamente corrosivas y, por consiguiente, las herramientas y los recipientes utilizados para prepararlas deben ser de plástico, cerámica u otro material resistente a la corrosión. El personal debe ser capacitado en el manejo de derrames y en los procedimientos correctos para la operación y mantenimiento del equipo.

Dosificador por succión (tipo Venturi)

El dosificador por succión más empleado es aquel que utiliza un dispositivo Venturi, el cual permite dosificar soluciones cloradas en tuberías presurizadas. Este tipo de clorador se basa en el mismo principio que el de eyector empleado en los cloradores a gas. El vacío creado por el flujo del agua a través del tubo Venturi succiona la solución de hipoclorito y la descarga directamente en la corriente de agua principal o en una corriente de derivación. La dosificación se regula ajustando una válvula de aguja instalada entre el dispositivo Venturi y el rotámetro, tal como se muestra en la figura.

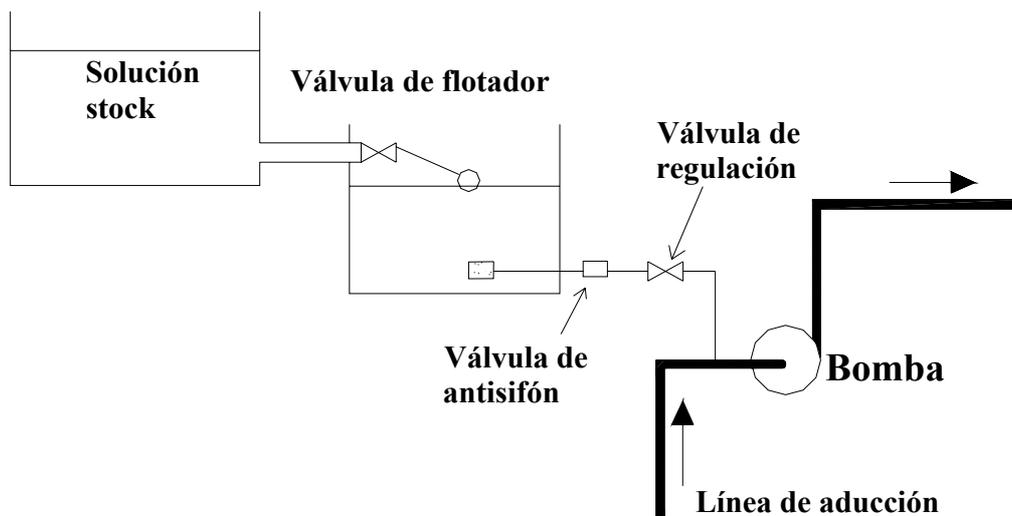


Venturi v rotámetro



Instalación típica del equipo

El hipoclorador tipo Venturi se consigue fácilmente en el mercado y es producido por varios fabricantes. El costo es relativamente bajo y es fácil de instalar, operar y mantener. La capacidad de dosificación varía de 1 a 25 litros/hora. Una ventaja importante es que si no fluye agua por el dispositivo, no se suministra la solución de cloro, lo que reduce la probabilidad de una sobredosificación. Sin embargo, si la concentración de solución madre que se inyecta es alta, puede dar lugar a algún ataque al rotor de la bomba. Otra forma de provocar succión para dosificar la solución de hipoclorito es conectando el dosificador a una tubería de aducción, tal como se muestra en la figura. Esta configuración deberá contar con una válvula antisifón para evitar el retorno en caso de que se detenga la bomba.



Dosificador en tubería de aducción

1 *Instalación y requerimientos*

El dispositivo Venturi tiene un rango de operación relativamente estrecho dentro del cual funciona eficientemente. Por este motivo, la selección del mismo debe considerar que los requisitos hidráulicos del dispositivo concuerden con las características del sistema de abastecimiento de agua (caudal máximo y mínimo). Por este motivo, los dispositivos Venturi no se deben emplear para fluctuaciones amplias de caudal y de presión que excedan su rango de operación. Los dispositivos Venturi deberán ser resistentes a soluciones fuertes de hipoclorito, ya que su potencial oxidante puede atacar el dispositivo y deteriorarlo rápidamente.

Los dispositivos Venturi pueden instalarse en una pared o directamente sobre las tuberías, dependiendo del diseño. La instalación es suficientemente sencilla como para no requerir un especialista. Todas las tuberías y tubos de plástico flexible deben instalarse adecuadamente para facilitar su operación y mantenimiento. Previamente, debe instalarse un filtro al dispositivo y debe tenerse en cuenta la remoción fácil del Venturi para limpiar los precipitados u otros depósitos que puedan obstruirlo. Al igual que con todos los hipocloradores, es preciso tomar precauciones especiales al diseñar las instalaciones de cloración y almacenamiento debido a la naturaleza reactiva de las soluciones de cloro.

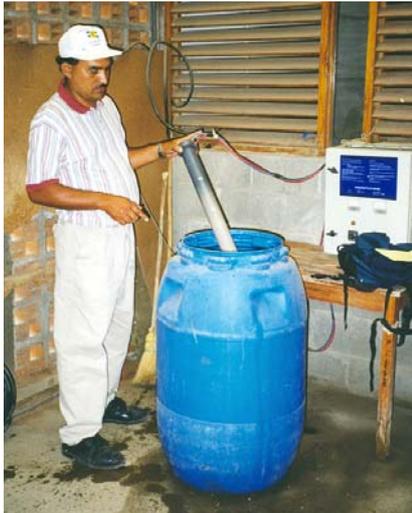
Para aceptar un flujo adecuado de agua, el dispositivo Venturi no requiere de grandes presiones de agua. Sin embargo, en algunos casos, se necesitara una fuente de energía eléctrica fiable para bombear una cantidad pequeña de agua a través del Ventura y producir así el vacío necesario.

1 *Operación y mantenimiento*

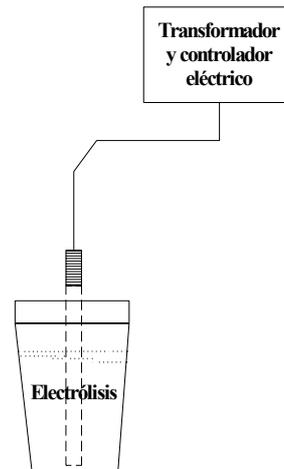
Los hipocloradores de tipo Venturi no son muy precisos, especialmente cuando el flujo varía mucho; en consecuencia, es necesario ajustar con frecuencia la dosificación. El Venturi de material acrílico es mejor porque permite al operador determinar visualmente cuándo hay que limpiarlo y además es resistente al hipoclorito. Todos los Venturi son sensibles a los depósitos de calcio que se pueden producir por la solución de hipoclorito o por el agua dura. Los Venturi se deben limpiar rutinariamente, si fuera necesario con ácido para eliminar los depósitos más duros y otros precipitados o sedimentos. La mayoría de los empaques de las juntas, válvulas de retención, resortes y juntas con el tiempo se deterioran por estar en contacto con el hipoclorito, por lo que deben reemplazarse periódicamente. Estas piezas de repuesto deben ser del material apropiado y estar a mano en todo momento.

Electrólisis de cloruro de sodio *in situ*

Dada su importancia, la desinfección no puede ser intermitente. En tal sentido, el aprovisionamiento continuo del desinfectante es un requisito fundamental que deberá ser tomado en cuenta al momento de seleccionar el mecanismo de desinfección. Es por ello que en pequeñas localidades o comunidades rurales alejadas o de difícil acceso, donde la continuidad del aprovisionamiento de hipoclorito no esté asegurada, ya sea por la disponibilidad del transporte o por la capacidad de adquirirlo en el momento oportuno, una alternativa que deberá ser evaluada es la generación de hipoclorito de sodio *in situ*.



NaClO in situ



La generación de hipoclorito *in situ* consiste en someter una solución de 30 gramos de cloruro de sodio/litro (3%) de concentración aproximada a un proceso de electrólisis, lo que permite obtener unos 400 litros al día de una solución estable con 5 a 7 g de cloro activo/litro (0,5 – 0,7%). A través de este mecanismo, es posible suministrar agua de calidad adecuada a una población de hasta 5.000 habitantes, ya sea por medio de sistemas convencionales de convencionales de dosificación en sistemas comunales o directamente en las viviendas. Los dispositivos generadores de hipoclorito de sodio *in situ* requieren energía eléctrica para su funcionamiento, lo que exige contar con una fuente de energía estable. En caso de no contar con la misma, una alternativa será acondicionar el equipo con paneles de energía y baterías.

Estos dispositivos, hasta hace algunos años, eran inadecuados técnicamente para ser aplicados como una alternativa de solución para los países en desarrollo debido a su complejidad y elevado costo. Sin embargo, están comenzando a popularizarse debido al uso de nuevos materiales, como el titanio, para la producción de ánodos dimensionalmente estables (DSA ánodos) y a mejoras en las fuentes de energía.

Para que los generadores de hipoclorito de sodio sean eficaces y apropiados para las condiciones existentes en zonas rurales y pueblos pequeños, tienen que:

- | ser económicos;
- | ser sencillos de operar y mantener;
- | ser fiables y duraderos, con producción uniforme;
- | ser capaces de usar sal de mesa (cloruro de sodio) disponible localmente, y
- | tener una capacidad de producción entre 0,5 y 2,0 kg de cloro en un período de 24 horas.

Se han desarrollado dispositivos comerciales en varios países y la OPS/CEPIS ha realizado una evaluación técnica de los más populares. La aplicación de estos sistemas deberá regirse por las características y los requisitos del abastecimiento de agua en consideración.

| ***Instalación y requerimientos***

El equipo incluye tanques de disolución. Además es necesario almacenar una reserva de sal, lo que requiere espacio adicional. Aunque los dispositivos para la producción de NaOCl son fáciles de instalar, es preciso tomar precauciones para separarlos de los componentes susceptibles a la corrosión como los controles eléctricos, motores, bombas, reguladores y otros equipos metálicos, ya que el ambiente inmediato a las unidades de producción suele ser muy corrosivo. Las instalaciones deben estar diseñadas de modo que se facilite el manejo de la sal y la transferencia de la solución de hipoclorito de un tanque a otro y al sitio de aplicación. Los locales deben estar bien ventilados.

La eficiencia de los diferentes tipos de equipo para producir hipoclorito de sodio varía un poco. La experiencia indica que se requieren 6 a 10 kilovatios/hora de energía eléctrica para producir un kilogramo de cloro disponible. Esta pequeña cantidad de energía se puede obtener de varias fuentes, como células solares, generadores de energía eléctrica por molino de viento o por energía hidráulica y otras. En todos los casos, la fuente de energía tiene que ser confiable. Una ventaja del sistema para la producción de hipoclorito de sodio *in situ* es que se puede operar en las horas que hay electricidad y almacenar el hipoclorito para usarlo en las horas en que falta la energía eléctrica.

Estos dispositivos son muy seguros porque producen soluciones de hipoclorito de sodio de concentración baja y en cantidades relativamente pequeñas, que en su mayor parte se utiliza de inmediato o en el corto plazo. A pesar del bajo riesgo, es preciso tomar precauciones, en especial cuando se abre la celda electrolítica, ya que puede acumularse cloro gaseoso en ella. En general, deben seguirse las precauciones indicadas para el uso del hipoclorito de sodio.

1 ***Operación y mantenimiento***

Este tipo de equipo es fiable si se fabrica de materiales resistentes a las propiedades sumamente corrosivas de los productos químicos a ser utilizados y producidos. El mantenimiento tiene que realizarse a intervalos regulares de acuerdo con las especificaciones. Un problema que puede ocurrir con ciertos tipos de dispositivos es la acumulación de depósitos en los electrodos debido a la presencia de calcio y magnesio en la sal. La formación de depósitos puede disminuirse utilizando sal refinada y agua de disolución de buena calidad. Los ablandadores de agua facilitarán esto último. Los ánodos de titanio con revestimiento de óxido de iridio o rutenio generalmente son muy duraderos (entre cuatro y seis años) y los de grafito (que algunos equipos utilizan en vez del titanio) duran alrededor de un año. Los ánodos de titanio se pueden limpiar con una solución de ácido clorhídrico.



Dosificadores y tanques de disolución

Dosificadores de hipoclorito de calcio sólido

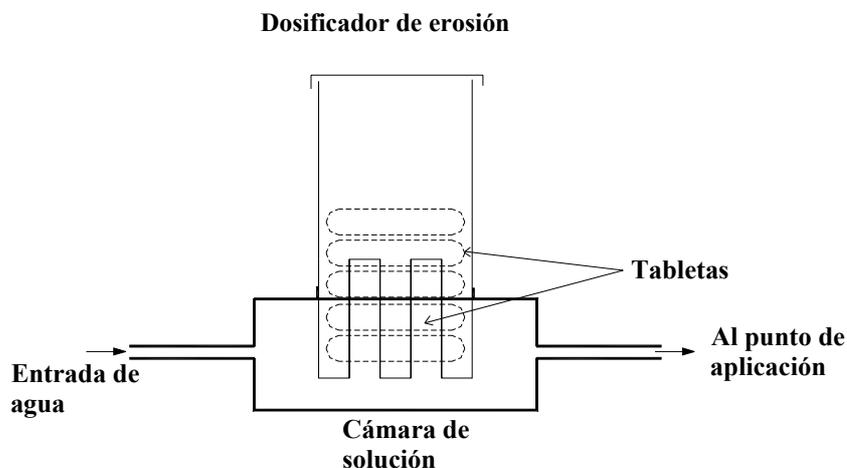
Los dosificadores de hipoclorito de calcio se fabrican para grandes o pequeños caudales. Los primeros son dosificadores volumétricos o gravimétricos, que dejan caer una cantidad medida (en volumen o en peso) en un pequeño tanque de disolución (siempre con agitación) donde se disuelve para ser luego dosificado en el punto de aplicación. El uso de estos equipos no es popular, ya que cuando se requiere tratar grandes caudales se prefiere el uso del cloro gas. Para tratar pequeños caudales (típicos de medianas y pequeñas comunidades) se utilizan equipos que funcionan por medio de la erosión de tabletas o que suministran directamente el hipoclorito de calcio sólido en forma de píldoras.

La concentración de cloro activo en estas presentaciones es entre 65% y 70%, a comparación del hipoclorito de calcio en polvo que solo alcanza 33%, los que se pueden obtener en el mercado bajo diferentes marcas. Sin embargo, hay que tener cuidado de que sean apropiadas para la desinfección de agua para consumo humano y que no contengan sustancias como los cianuratos. Los cianuratos de sodio, que liberan también cloro al ser disueltos en el agua, solo deben usarse en situaciones de emergencia, ya que no existe evidencia suficiente de su inocuidad cuando son utilizadas de forma prolongada.

Dosificador por erosión de tabletas y de píldoras

Los dosificadores que trabajan bajo el sistema por erosión utilizan tabletas de hipoclorito de calcio de alta concentración (HTH), las que se pueden obtener de distribuidores o pueden prepararse localmente comprimiendo mecánicamente polvo de hipoclorito de calcio. Este sistema ha encontrado un lugar importante en la desinfección de abastecimientos de agua para comunidades pequeñas y familiares. Los equipos son muy fáciles de manipular y mantener, además de ser baratos y duraderos. Las tabletas son más seguras que las soluciones de hipoclorito y el cloro gaseoso y son más fáciles de manejar y de almacenar.

Los dosificadores de erosión disuelven gradualmente las tabletas de hipoclorito a una tasa predeterminada mientras fluye una corriente de agua alrededor de ellas. Este mecanismo proporciona la dosificación necesaria de cloro para desinfectar el agua. A medida que las tabletas se van diluyendo, se reemplazan con otras nuevas que caen por gravedad en la cámara. La solución de cloro concentrada alimenta un tanque, un canal abierto o un reservorio, según sea el caso.



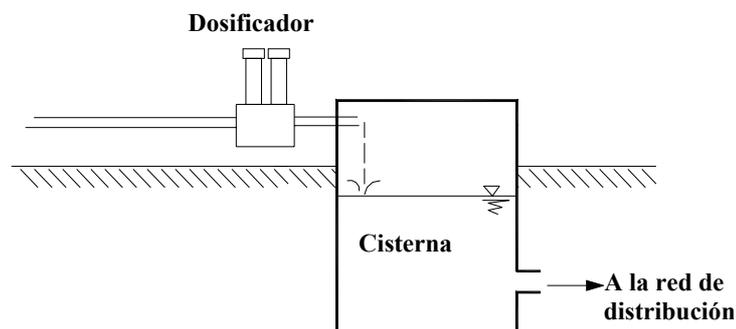
En el mercado se encuentran dosificadores de píldoras para pozos profundos (o tanques de almacenamiento), que suministran las píldoras a una velocidad constante susceptible de regulación. Las píldoras, al sumergirse, se disuelven lentamente, lo que proporciona un cloro residual razonablemente constante. Estos dosificadores se recomiendan solo cuando la operación es continua.



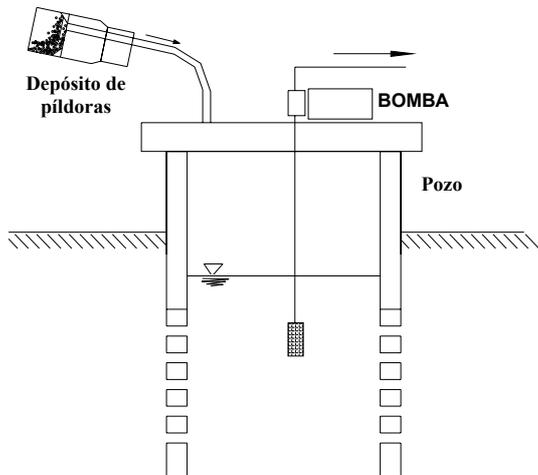
Instalación y requerimientos

La instalación de esta clase de dosificadores requiere una capacitación especializada mínima. En la mayoría de los casos se puede capacitar a un operador y ofrecerle conocimientos básicos de plomería y tuberías. Sin embargo, aunque los dispositivos de dosificación están hechos de materiales no corrosivos y no tienen partes móviles, es preciso prestar atención a las instrucciones del fabricante para asegurar la durabilidad y una operación adecuada de acuerdo con las especificaciones. También se debe prestar atención a la temperatura del agua, ya que de ella depende la solubilidad de las tabletas.

Las figuras ilustran la instalación típica para cloradores por erosión de tabletas y de un dosificador de píldoras..



Instalación típica de un clorador por erosión de Tabletillas de hipoclorito de calcio



Instalación típica de un dosificador de cloro a base de Píldoras de hipoclorito de calcio

El dosificador por erosión de tabletas solo requiere la energía hidráulica necesaria para que corra el agua a través de él. Este tipo de dosificador de cloro ofrece mucha flexibilidad, tanto en la cantidad de cloro como en la ubicación de los puntos de aplicación. Para sistemas más grandes pueden usarse varios dosificadores.

Operación y mantenimiento

Los dosificadores por erosión de tabletas y los de píldoras son sencillos de operar. El equipo se calibra de manera sencilla pero no muy precisa por medio de un ajuste de la profundidad de inmersión de la columna de tabletas o de la velocidad o caudal que se hace pasar por la cámara de disolución. Una vez calibrado el equipo, si no hay grandes variaciones en el flujo, normalmente requieren de poca atención, excepto para cerciorarse de que el depósito esté lleno de tabletas para asegurar la dosificación continua. El mecanismo del dosificador de tabletas se debe inspeccionar con regularidad para detectar obstrucciones; se tendrá cuidado de limpiarlo bien, volver a ponerlo en la posición correcta y calibrarlo. La inspección y el relleno de tabletas dependerán de la instalación específica, de la dosificación de cloro y del volumen de agua tratada. Debido a la sencillez de operación del equipo, el personal se puede capacitar rápidamente.

En cuanto a la seguridad, en general, las tabletas de hipoclorito son más fáciles y seguras de manejar y almacenar que otros compuestos de cloro; sin embargo, es necesario observar precauciones de seguridad mínimas. Es importante no usar tabletas destinadas a piscinas porque suelen contener isocianurato, un compuesto químico no recomendable para el consumo humano prolongado.

Ventajas y desventajas de los métodos

Se ha preparado el siguiente cuadro para facilitar la comparación de los dosificadores de cloro que se han descrito.

Cuadro comparativo de ventajas y desventajas de los dosificadores de cloro y derivados

Clasificación	Dosificador	Ventajas	Desventajas	
Cloro gaseoso	<ul style="list-style-type: none"> • Al vacío • A presión 	Tecnología generalizada en el mundo. Producción de cloro gaseoso en casi todos los países. Producto químico barato. En el caso del clorador a presión no se requiere de energía eléctrica.	Instalación costosa para pueblos muy pequeños. Necesita equipo auxiliar. El personal necesita capacitación. Si no es operado adecuadamente puede ser peligroso debido a que el gas es venenoso. No es recomendando para sistemas que tratan caudales menos de 500 m ³ /día. En el caso del clorador al vacío requiere de energía eléctrica.	
	Bajo presión atmosférica, de carga constante			
Cloro en solución	Tanque con válvula de flotador	Sumamente sencillo de operar y mantener. Muy barato. Pueden construirse localmente. Confiable. No necesita energía eléctrica. Permite dosificaciones para caudales mínimos. Puede usarse en cualquier situación, excepto en pozos tubulares cerrados.	La dosificación no es muy precisa. Error de alrededor de 10%. Exige un control constante debido a la variación de las dosificaciones. El material se puede corroer.	
	Tubo con orificio en flotador	Carga constante. Sumamente sencillo. Muy barato. Pueden construirse localmente. Confiable. No necesita energía eléctrica.	Según la manera en que el sistema fue construido, puede llegar a tener un error de dosificación de hasta un 20%.	
	Sistema vaso/botella	Sumamente sencillo. Muy barato. Puede construirse localmente. Ideal para comunidades pequeñas. Error de dosificación menor del 10%. No necesita energía eléctrica.	Debe mantenerse limpio.	
	Bajo presión positiva o negativa			
	Bomba de diafragma (positiva)	Sumamente confiable. Muy popular. Sencillo de operar. Uno de los pocos sistemas para trabajar bajo presión. Puede introducir la solución directamente en tuberías de agua presurizada hasta con 6.0 kg/cm ² .	El personal debe capacitarse en su operación y mantenimiento. Costo intermedio a elevado para un sistema rural. Requiere energía eléctrica. Debe vigilarse. A veces hay corrosión en el rotor de la bomba debido al cloro.	
	Dosificador por succión (negativa)	Muy sencillo. La solución más barata para una alimentación en tuberías presurizadas.	Requiere vigilancia y mantenimiento para evitar obstrucciones en dispositivo Venturi.	
	Generador de hipoclorito de sodio <i>in situ</i>	No requiere transporte de productos clorados. Se produce in situ. Sencillo y fácil de operar.	Requiere de agua blanda para que no se acumulen depósitos en los electrodos. Requiere de vigilancia constante y personal entrenado para tomar precauciones de seguridad por la formación de gas cloro. Producción limitada a la capacidad del equipo.	
Cloro sólido	Dosificador de erosión	Sumamente sencillo. Ideal para pequeñas comunidades. Una de las mejores soluciones para dosificación a la entrada de un tanque. No necesita energía eléctrica.	Costo intermedio. Alrededor de 10% de errores en la dosificación. Necesita tabletas. En algunos dosificadores las tabletas (si se producen localmente) tienen a adherirse o a formar cavernas y no caen en la cámara de disolución.	

Monitoreo de los compuestos de cloro y sus derivados

La medición regular de la cantidad de cloro residual permite controlar el funcionamiento del equipo y la ausencia de contaminación en la red de distribución. Por ello, esta medición resulta imprescindible.

Existen varios métodos para medir el cloro residual en el agua. Dos de los más sencillos se presentan a continuación:

u *Método del dietil-para-fenilendiamina (DPD)*

El cloro libre disponible reacciona instantáneamente con la N-dietil-parafenilendiamina y produce una coloración rojiza, siempre que haya ausencia de yodo. Las soluciones estándar de DPD–permanganato de potasio se usan para producir colores de diversas intensidades. De esta forma, el DPD puede usarse como un método colorimétrico para medir la concentración del cloro residual. El color producido por este método es más estable que el del método de la ortotolidina.

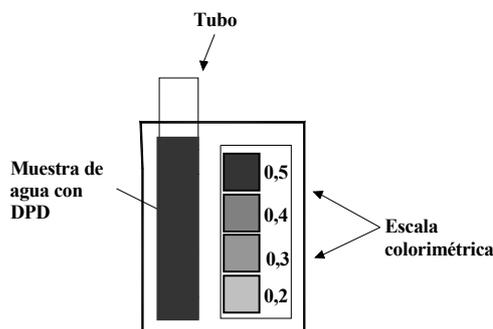
Este método sencillo emplea pastillas de DPD que se disuelven en una muestra de agua con cloro, lo que produce la coloración rojiza que por comparación permite determinar la concentración en mg/l de cloro residual. El dispositivo empleado para este propósito se denomina “comparador de cloro”.

u *Método de la ortotolidina*

La ortotolidina es un compuesto aromático que se oxida en una solución ácida por acción del cloro, cloramidas y otros oxidantes para producir un complejo de color amarillo, cuya intensidad es directamente proporcional a la cantidad de oxidantes presentes. El método es apropiado para la determinación de rutina del cloro residual que no exceda 10 mg/l. La presencia de color natural, turbiedad y nitratos dificultan el desarrollo del color. Debido al hecho demostrado de que la ortotolidina es carcinogénica, se recomienda manipular el producto químico con precaución.

u *Medición de la concentración de cloro*

El cloro deberá ser medido en los siguientes puntos del sistema de abastecimiento de agua:



Comparadores de cloro con el método de O-T y de DPD

- 1 Después de la cloración, a la salida de la planta de tratamiento, para verificar si las cantidades del desinfectante son las correctas.

Es importante tener en cuenta que si en la planta de tratamiento no existe un reservorio de almacenamiento para una mezcla del agua con el desinfectante, el tiempo de contacto entre el cloro y el agua puede ser tan pequeño que la demanda de cloro no sea atendida. En este caso, el valor obtenido puede indicar la presencia de “cloro activo”, pero en los minutos que le siguen, este va a ser consumido por la materia orgánica. Conviene, pues, esperar por lo menos 30 minutos entre la inyección del cloro en el agua y la medición de la concentración residual del desinfectante.

- 1 En el grifo del consumidor más alejado de la planta de tratamiento. Esta medida permite evaluar si hubo o no, contaminación en la red de distribución. Tales mediciones deben ser efectuadas varias veces en el día, todos los días del año.

Costos de equipos y de operación y mantenimiento

Los costos de los equipos varían según la cantidad y tipo de producto químico que se va a usar, el tipo de control (de requerirse alguno) y las necesidades de instalación. En el cuadro correspondiente se aprecian los costos estimados de los equipos.

Los costos de operación y mantenimiento varían según el tipo de producto químico utilizado, el tamaño y la complejidad del equipo. Los fabricantes de equipos proporcionan una lista de los repuestos recomendados que, como mínimo, deben estar disponibles. La mayoría de los fabricantes capacitan al personal de la planta de tratamiento en el mantenimiento y servicio de su equipo. Además, algunos proporcionan un programa de intercambio para que sus equipos reciban mantenimiento en sus instalaciones. Esto permite al personal de operación enviar el equipo a reparación mientras se instala una unidad de repuesto o intercambio para que opere durante el período de reparación.

En general, los costos de la cloración son muy bajos; no obstante, existen diferencias cuando se comparan los costos de cloro gas versus la hipocloración. En muchos lugares del mundo, el costo del gas representa una cuarta o la mitad del costo de una solución equivalente de hipoclorito. Sin embargo, la inversión inicial en un sistema de cloración de gas y los requisitos de instalación y operación generalmente son mayores que en las instalaciones de hipocloración, algunas de las cuales son de costo prácticamente cero. Esto hace que el cloro gaseoso usualmente esté en desventaja económica en aquellos sistemas de abastecimiento de agua muy pequeños.

La experiencia sugiere que el punto de equilibrio del costo entre el gas y la hipocloración sería una tasa de dosificación de aproximadamente 500 a 1.000 mg de cloro al día. Para comunidades de tamaño medio, la selección de gas o de hipocloritos tendrá que estudiarse cuidadosamente, pues las ventajas y desventajas pueden traslaparse y la selección puede que tenga que basarse en factores adicionales. Una consideración importante al seleccionar uno u otro debe ser el nivel de aptitud requerida del operador y la capacidad de la comunidad para costearla. En cada caso se requiere un análisis detallado de todos los factores importantes y de las circunstancias predominantes.

Costos relativos de los distintos sistemas de cloración

Clasificación	Dosificador	Descripción del equipo	Costos de capital en dólares americanos		
Cloro gaseoso	Al vacío	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dosificador de cloro al vacío, instalado en cilindro, con inyector-difusor ▪ Dosificador manual de gas, instalado en recipiente ▪ Dosificador automático de gas, instalado en la pared ▪ Dosificador automático de gas, instalado en gabinete ▪ Bomba de mano para alimentación de compuestos químicos ▪ Bomba automática para alimentación de compuestos químicos ▪ Detector de gas instalado en la pared ▪ Estuche de emergencia tipo A ▪ Estuche de emergencia tipo B ▪ Cilindro de cloro gas de 70kg con válvula ▪ Balanza ▪ Bomba reforzadora y tuberías 	\$900 – 1200 \$2.000 \$4.000 \$6.000 \$1.000 \$3.000 \$2.000 \$1.500 \$2.500 \$350 – 400 \$220 \$250		
		Bajo presión atmosférica, de carga constante			
		Tanque con válvula de flotador	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hipoclorador con válvula de flotador, el tanque de solución y tuberías ▪ Hipoclorito de sodio por kilogramo de cloro disponible 	\$50 – 80	
		Tubo con orificio en flotador	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hipoclorador con orificio sumergido de carga constante, el tanque de solución y tuberías ▪ Hipoclorito de sodio por kilogramo de cloro disponible 	\$20 – 60	
		Sistema vaso /botella	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tanque de solución, tuberías y dispositivo vaso/botella ▪ Hipoclorito de sodio por kilogramo de cloro disponible 	\$10 – 50	
		Bajo presión positiva o negativa			
		Bomba de diafragma (positiva)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bomba de diafragma con controles eléctricos, tanque plástico para la solución y tuberías ▪ Hipoclorito de sodio por kilogramo de cloro disponible 	\$700 - 1000	
		Dosificador por succión (negativa)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tanque de solución, tuberías y Venturi ▪ Hipoclorito de sodio por kilogramo de cloro disponible 	\$200 – 350	
		Generador de hipoclorito de sodio <i>in situ</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Celdas con sistemas de regulación eléctrica 	\$500 - 10.000	
		Cloro sólido	Dosificador de erosión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dispositivos dosificadores por erosión 	\$150 – 400

Fuentes de información

Christman, K. *Cloro*. Trabajo presentado en el Simposio OPS: Calidad de Agua, Desinfección Efectiva (1998). Publicado también en CD-Rom. Disponible en la OPS/CEPIS.

Góngora, J. *Sistemas de desinfección por medios hidráulicos para agua potable rural. Experiencia colombiana*, Trabajo presentado en la Publicación CEPIS “Investigación sobre desinfección de agua en abastecimientos rurales” (1983).

OPS. *La desinfección del agua*. Publicación OPS/HEP/99/32 (1999).

OPS/ILSI. *La calidad del agua en América Latina. Ponderación de los riesgos microbiológicos contra los riesgos de los subproductos de la desinfección química*, ILSI Press, Washington DC (1996).

Reiff, F. *Disinfection practices in developing areas*. Trabajo presentado en el Curso NSF sobre Desinfección de Aguas en Washington DC (1998).

Reiff, F.; Witt, V. *Guía para la selección y aplicación de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y el Caribe*. Documento OPS/OMS, Serie Técnica No. 30 (1995).

Rojas, R., Guevara, S. *Celdas electrolíticas para producción in situ de hipoclorito de sodio*; Publicación CEPIS/GTZ (1999).

Solsona, F. *Investigación sobre desinfección de agua para abastecimientos rurales en Argentina*. Trabajo presentado en la Publicación CEPIS “Investigación sobre Desinfección de agua en abastecimientos rurales” (1983).

Solsona, F. *Water disinfection for small community supplies*, Capítulo de desinfección del agua para el manual del IRC “Small Community Supplies” y disponible como separata en la OPS/CEPIS (2001).

Solsona, F. *Disinfection for small water supplies; technical guide*. Publicación CSIR, Sud Africa (1990).

White, C. *Handbook of chlorination*, Van Nostrand Reinhold (1972).

WHO/WRC. *Disinfection of rural and small community water supplies* (1989).